

Identificação de depressões fechadas em ambiente cárstico a partir de diferentes Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Natasha Bernardes Sales^{1*}, Ana Karolyna Nunes Amaral², Luis F. S. Cherem³

¹Graduanda em Geografia no Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, Brasil. (*Autor correspondente: natashabernardessales@gmail.com)

²Doutoranda em Análise Ambiental e Meio Ambiente, do programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás, Brasil.

³Professor do Departamento de Geografia Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 18/04/2023 – Revisado em: 10/05/2023 – Aceito em: 07/07/2023

RESUMO

Modelos digitais de elevação (MDE) obtidos de diferentes sistemas sensores têm sido amplamente estudados nos últimos anos, especialmente no que diz respeito a avaliação de suas consistências hidrológicas, visando avaliar a continuidade do escoamento superficial. Essa pesquisa tem como objetivo comparar diferentes modelos na identificação de depressões fechadas classificam corretamente as dolinas em ambientes cársticos. Utilizou-se o método semiautomático de identificação de dolinas, com base em parâmetros morfométricos, em ambiente SIG, para identificação de feições deprimidas na região cárstica Noroeste do Grupo Bambuí, em Goiás. O software utilizado foi ArcMap 10.3. Após a preparação do modelo digital de elevação (projeção, recorte e mosaico), foi utilizada a ferramenta Fill para preenchimento de depressões nos modelos, e depois na ferramenta minus, subtraiu-se o MDE original do preenchido e transformado em shapefile para calcular as medidas de área desses polígonos que correspondentes aos modelos digitais de elevação nos fornecem os valores do Índice de Circularidade. Esses procedimentos foram replicados passo a passo para todos os modelos digitais de elevação. Desse modo, escolheu-se duas feições de Dolinas para avaliar o desempenho dos diferentes MDE, a validação dessas Dolinas se deu por meio de outros trabalhos já publicados na mesma área de estudo. Foram calculados os valores médios de área, perímetro e Índice de Circularidade e comparados os valores de área de cada Modelo Digital de Elevação gerados após o processamento. Os modelos AW3D30 NasaDEM e TanDEM-x apresentaram valores satisfatórios na delimitação dessas Dolinas.

Palavras-Chaves: Dolinas, MDE, Semiautomática.

Identifying closed depressions in karst environments from different Digital Elevation Models.

ABSTRACT

Digital elevation models (DEM) obtained from different sensor systems have been widely studied in recent years, especially with regard to the evaluation of their hydrological consistencies, evaluating the continuity of surface runoff. This study aims the semiautomatic identification of sinkholes derived from closed depressions at different DEM from karst environments. A semiautomatic method of sinkhole identification based on morphometric parameters was applied at the northwest karst region of the Bambuí Group, in Goiás. The software used was ArcMap 10.3. After preparing the digital elevation model (projection, clipping and mosaic), the Fill tool was used to fill in depressions in the models, and then the minus tool was used to subtract the original DEM from the completed one and transform it into a shapefile to calculate the measurements. area of these polygons that correspond to the digital elevation models provide us with the values obtained for the Circularity Index. These procedures were replicated step by step for all digital elevation models. Thus, two sinkhole features were chosen to evaluate the performance of the different MDE, the validation of these sinkholes occurrence was done through databases already published for the area of study. The average values of area, perimeter and Circularity Index were calculated, and the area values of each Digital Elevation Model generated after processing were compared. The AW3D30 NasaDEM and TanDEM-x models showed satisfactory values in the delimitation of these sinkholes.

Keywords: Sinkholes, DEM, Semiautomatic.

Sales, N. B., Amaral, A. K. N, Cherem L. F. S. (2023). Identificação de depressões fechadas em ambiente cárstico a partir de diferentes Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto.*, v.4, n.2, p.13-20.



1. Introdução

A elaboração de um modelo digital de elevação consiste no armazenamento de cotas altimétricas (z) em um arquivo digital com linhas e colunas. Dessa maneira, podemos derivar algumas variáveis como: curvatura vertical e horizontal, declividade, formas de relevo e alguns atributos da drenagem como aponta Valeriano (2004). Dessa forma se inserem como uma contribuição importante na extração das variáveis morfométricas do relevo, principalmente no que diz respeito a grandes extensões de áreas pois reduzem a necessidade de trabalho manual na identificação de algumas feições.

Em ambientes cársticos, os Modelos digitais de Elevação podem ser utilizados na identificação de feições relacionadas a este tipo de terreno. Esses ambientes representam áreas com intensa dissolução, especialmente em rochas solúveis, como evaporitos e carbonatos. Dentre as diversas estruturas geradas nesse tipo de ambiente, as dolinas se destacam como uma das principais feições, sendo utilizadas para designar depressões que ocorrem na superfície terrestre conectadas à condutos subterrâneos (Pardo et al., 2013; Carvalho et al., 2014; Ferreira & Uagoda 2019).

Inicialmente o termo 'dolina' foi designado por Cvijic (1893) ele as caracterizou como depressões fechadas circulares ou elípticas que se formam na superfície, em função da dissolução de rochas solúveis, normalmente em subsuperfície, podendo alcançar de poucos a centenas de metros de profundidade e diâmetro. Ford e Williams (2007) trazem também uma definição bastante usual sobre dolinas, representadas por depressões naturais que se apresentam na superfície em tamanhos e formatos variados, mas normalmente em aspectos circulares a sub-circulares, variando desde poucos metros até quilômetros de diâmetro.

Confere às dolinas importante significado nas análises ambientais e de vulnerabilidade de aquíferos, uma vez que são feições consideradas de risco geológico por sua baixa estabilidade no terreno, e também por apresentar conexões entre a superfície e o sistema cárstico subterrâneo por meio de fluxos, demonstrando-se de mais fácil percolação do que em meio rochoso (Zwahlen, 2004). Hiruma et al. (2007) apontam que as depressões fechadas concentram pontos de absorção pelo escoamento superficial, onde contaminantes podem ser rapidamente carreados para o aquífero, sendo o mapeamento dessas feições de fundamental importância para o planejamento dos recursos hídricos em regiões cársticas.

São poucos os estudos sobre dolinas no Brasil, principalmente considerando o tamanho continental de seu território e a variedade e extensão de ambientes cársticos ou propensos a dolinamento. Deve-se isso a dificuldade de identificação dessas feições em campo, que dispense muito tempo e recursos, sendo uma alternativa a identificação por meio de sensoriamento remoto, o qual pode-se ter uma visão mais abrangente da área em menor quantidade de tempo.

Nesse sentido, esse trabalho tem o objetivo de testar o método semiautomático de Carvalho (2014) em diferentes Modelos Digitais de Elevação disponibilizados gratuitamente. Esse método semiautomático executado em SIG utiliza-se de parâmetros morfométricos na identificação dessas feições circulares como o perímetro, a área e o índice de circularidade.

A área de estudo está localizada na parte oeste do estado de Goiás e leste da Bahia e compreende uma parte que está a Sul do Vão do Paranã e Oeste do Chapadão Central e cobrindo aproximadamente 4747 km². Essa área tem o predomínio de rochas do grupo Bambuí as quais tem presença de rochas carbonáticas que propiciam o surgimento de feições cársticas.

2. Material e Métodos

Inicialmente foi feito uma revisão bibliográfica de trabalhos da área como o de Ferreira & Uagoda (2019) para entender melhor a classificação de feições cársticas e o uso do Modelo Digital de Elevação Ferreira & Uagoda (2019), Carvalho (2014). Selecionou-se a área de estudo que compreende A partir disso foram baixados seis Modelos Digitais de Elevação, sendo eles (Quadro 1):

Quadro 1 – Modelos Digitais de Elevação utilizados na pesquisa.

(a) ALOS PALSAR - resolução espacial de 12,5 metros, adquiridos a partir da reamostragem do MDE SRTM. Este foi lançado pela empresa JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) em 2014 para que os usuários das imagens do sensor PALSAR pudessem fazer suas correções;
(b) ASTER GDEM - resolução espacial de 30 metros, derivadas do satélite TERRA lançadas a partir de uma parceria entre a NASA e Ministry of Economy Trade and Industry (METI) do Japão e disponibilizado em 2014;
(c) ALOS (AW3D30) - resolução espacial de 30 metros as imagens são derivadas do Satélite ALOS e do sensor PRISM, lançando pela JAXA e disponibilizado em 2019.
(d) COP DEM (COPERNICUS DEM) - com resolução espacial de 30m é um modelo digital de elevação baseado no conjunto de dados WorldDEM lançado a partir de uma parceria do Centro Aeroespacial Alemão com a Airbus e disponibilizado em 2020;
(e) NASADEM – com resolução espacial de 30 metros é advindo de um reprocessamento das imagens do SRTM, com uma altimetria mais precisa e refinada, com base nas elevações das imagens ASTER.
(f) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – resolução espacial de 30 metros, seus dados de radar foram coletados a bordo da nave espacial Endeavour, as instituições responsáveis foram a National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA) ambas localizadas nos EUA;
(g) TanDEM X-90 – com resolução de 90 metros, estes foram adquiridos a partir da missão do satélite TanDEM X que junto ao satélite TerraSAR X, ambos com interferômetro de radar de abertura sintética configurável, mapearam a superfície entre 2010 e 2015 essa missão foi um projeto conjunto entre o Centro Aeroespacial Alemão, DLR e a Astrium GmbH ambas da Alemanha e disponibilizado em 2016.

Os Modelos Digitais de Elevação ALOS PALSAR, ASTER GDEM, NASADEM e SRTM foram baixados do portal Earth Data da NASA, as imagens da COP DEM foram adquiridas no site da Agência Espacial Européia ESA (European Space Agency), já o AW3D30 e Tan DEM foram baixados do portal Open Topography.

Após a obtenção de todas as imagens, iniciou-se os procedimentos no software ArcMap 10.5. Foi traçado um polígono que serviu como recorte de estudo e de comparação, dos Modelos Digitais de Elevação utilizados, o mesmo possui uma área de 47.454km².

Inicialmente foi realizado os mosaicos dos respectivos MDEs a partir da ferramenta Mosaic To New Raster e recortado a partir da ferramenta Extract by Mask de acordo com o retângulo envolvente. Foi executada a ferramenta Fill a partir do caminho: Spatial Analytics Tools > Hydrology > Fill como output se obteve um raster preenchido nomeado fill.shp.

Após a geração do arquivo raster preenchido, foi subtraído a camada raster não preenchida pela camada raster preenchida através do caminho: Spatial Analyst Tools > Math > Times o output foi um raster de saída com valores negativos de profundidade. Logo após, é transformado o output em um shapefile do tipo polígono a partir da ferramenta Raster to Polygon, sendo assim, todos os valores menores que - 3 foram deletados na tabela de atributos.

Em seguida adicionou-se uma coluna na tabela de atributos chamada valor e definiu-se todos os valores = 1. Após isso foi dissolvida todas as feições de polígonos em apenas um só polígono em Data Management Tools > Generalization > Dissolve. A saída foi um shapefile com um único polígono de valor 1 nomeado dissolve1.shp. Após essa etapa iniciou-se uma série de procedimentos com os arquivos shapefile no intuito de fechar “buracos” gerados nos polígonos e suavizar a borda dos mesmos, esses procedimentos são indispensáveis para o cálculo da área, do perímetro e depois do Índice de Circularidade (IC). Portanto, o arquivo dissolve.shp foi inserido em Data Management Tools > Features > Multipart To Single Part o arquivo de saída é um shape com mais de uma feição nomeado multipart.shp.

O recorte da área foi inserido em Analysis Tools > Overlay > Erase e em apagar feições, foi inserido o shape multipart.shp. O resultado foi um polígono nomeado de erase.shp representado pela área externa dos polígonos gerados na ferramenta Multipart To Single Part. Selecionou na camada erase.shp na tabela de

atributos, polígonos externos as feições da camada multipart.shp. Dessa forma foi possível apagar todos os valores externos das feições mantendo o preenchimento dos buracos de multipart.shp.

Na ferramenta Union, foi inserido o erase.shp e o multipart.shp com o objetivo de preencher os buracos em multipart.shp. O novo arquivo é nomeado de union.shp e então, passa pela ferramenta “Dissolve”, para dissolver o preenchimento no polígono, o output foi inserido em Multipart To Single Part buscando separar os polígonos na tabela de atributos. Logo em seguida, esse arquivo passa pela ferramenta Smooth no intuito de suavizar os polígonos, como parâmetro considerou-se 500 metros.

Feito o processo de preenchimento dos buracos dos polígonos passa-se a realizar os procedimentos a partir da Attribute Table no intuito de calcular o índice de circularidade (1) onde A= área em m² e P= perímetro.

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2} (1)$$

É gerada uma nova coluna na tabela de atributos nomeada area_m² e em Calculate Geometry é calculado o valor em metros da área de todos os polígonos. Esse procedimento foi replicado para calcular o perímetro, adicionando uma coluna chamada perímetro. Feito isso, foi adicionada uma nova coluna na tabela de atributos nomeada de IC e em field calculator selecionou-se Python e transcreveu-se a fórmula (2) da seguinte maneira:

$$IC = (4 * !area_m^2 ! * math pi)/(!perímetro! ** 2) (2)$$

Após o cálculo dos polígonos no software ArcMap 10.5, foram comparados os valores de área em km² de duas Dolinas presentes no centro da figura 2, sendo que a Dolina 1 corresponde a feição maior ao Sul e a Dolina 2 corresponde a feição a Norte. Isso foi feito para associar como o processamento dos diferentes modelos digitais de elevação se comportou na delimitação dessas feições.

Também foram comparados os polígonos gerados na área total a fim de entender o comportamento dos Modelos Digitais de Elevação frente às feições que foram identificadas pelo processamento, mas que não são dolinas como ruídos e rede de drenagem.

3. Resultados e Discussão

Com base nas análises realizadas observou-se inicialmente, diferenças expressivas entre as altitudes das imagens avaliadas. A imagem do ASTER GDEM, foi aquela que apresentou a maior altitude dentre todas as outras, indicando um valor máximo de 1052 metros e valor mínimo de 495 metros, apresentando uma diferença altimétrica de 530 metros, do ponto mais alto ao ponto mais baixo da área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados comparativos das imagens rasters analisadas.

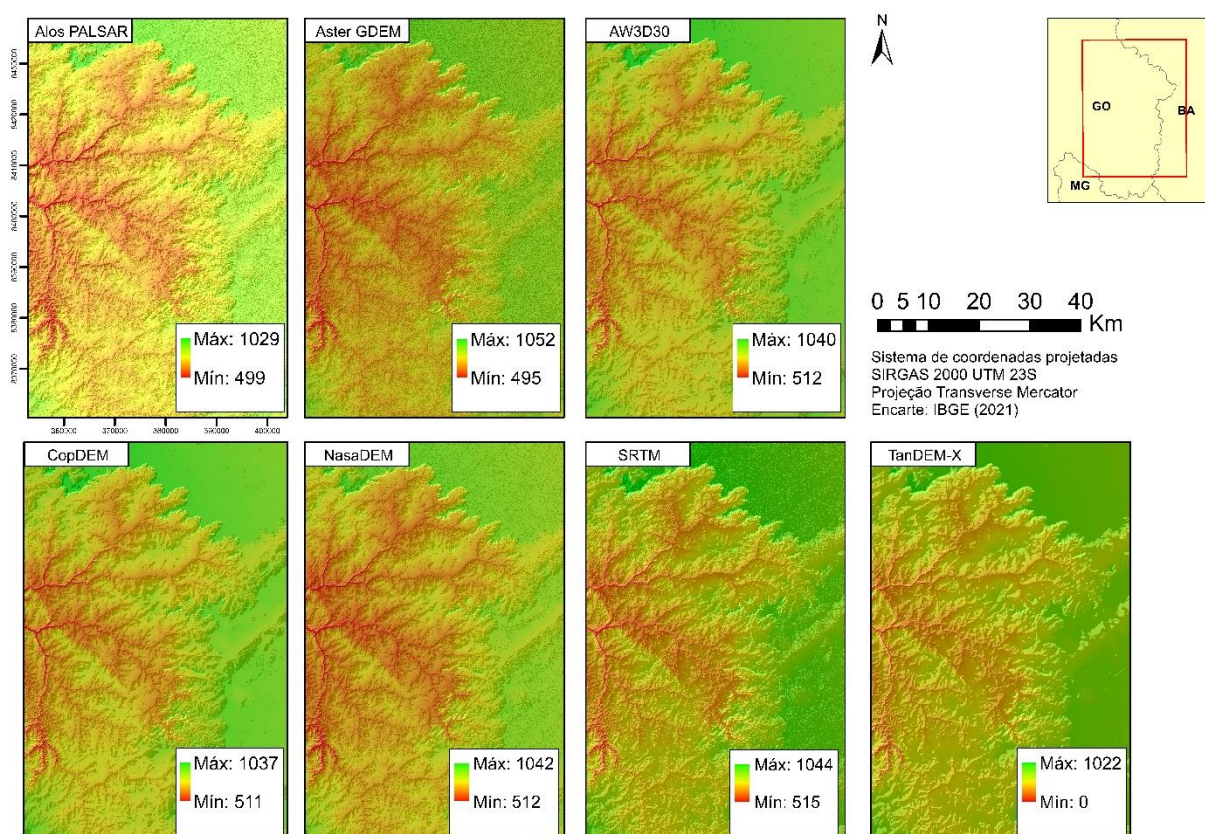
Modelo Digital de Elevação	Altitudes	Altitudes	Diferenças
	Máximas	Mínimas	Altimétricas
	(m)	(m)	(m)
ALOS PALSAR	1029	499	530
ASTER DEM	1052	495	557
ALOS 30 M	1040	512	528
COP DEM	1037	511	526
NASADEM	1042	512	530
SRTM	1044	515	529
TanDEM-X	1022	0*	1022*

Fonte: Os autores (2022)

A outra imagem que apresentou o mesmo valor de diferença altimétrica que a ALOS PALSAR, foi a imagem do NASADEM, a qual apesar das diferenças de altitude, máximo 1042 metros e mínimo de 512 metros, indicou a mesma proporção nas diferenças. Cabe destacar, que as imagens do NASADEM são refinadas a partir da altitude das imagens ASTER de acordo com o site do Earth Data Science (2020).

Destaca-se que os valores mínimos indicados pela imagem TanDEM-X se mostraram bem divergentes do indicado pelas outras imagens, demonstrando uma altitude que se assemelha ao indicado em regiões próximas ao mar, onde a altitude é próxima de zero, o que não é o caso aqui. Diante disto, para análise em questão, não considerou os dados da imagem raster TanDEM-X. A extensão dos modelos digitais de elevação e seus valores de altitudes máximas e mínimas podem ser visualizados na Figura 1 abaixo.

Figura 1- Vista dos Modelos Digitais de Elevação utilizados e suas respectivas altitudes máximas e mínimas.



Fonte: Os autores (2022).

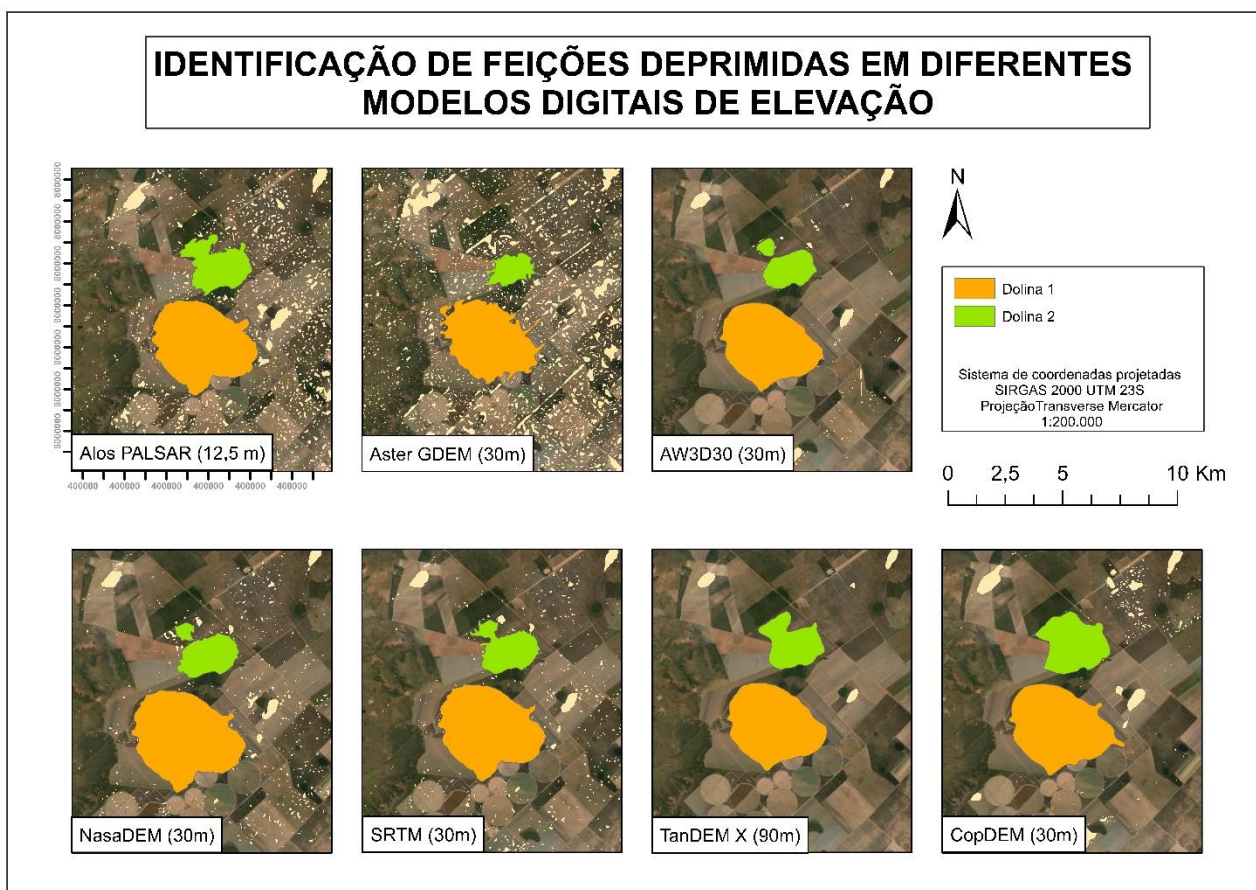
Escolheu-se uma área com maior concentração de feições circulares geradas. Desse modo foram comparadas no sentido centro-oeste duas dolinas de forma a entender como foi o comportamento dos diferentes modelos frente a metodologia proposta (Figura 2). Essas dolinas também foram identificadas no artigo de Bispo et al. (2022), a qual buscou mapear dolinas no chapadão central utilizando a mesma metodologia semiautomática de Carvalho (2014) aliada a fotointerpretação.

Os valores das áreas das dolinas e do Índice de Circularidade foram exportados para uma tabela no Excel, onde foram calculados os valores de média do índice de circularidade (IC) e da área para todos os modelos. Sendo assim, o valor médio da Dolina 1 é de 13,89 km² e para a Dolina 2 o valor é de 4,32 km². Para os modelos testados, o menor valor de área para a Dolina 1, foi de 12,65 km², a partir do modelo ASTER

GDEM e maior o foi de 14,49 km² com a COP DEM. Para a Dolina 2, os valores variaram de 2,47 km² a 7,07 Km² com os modelos ASTER e COP DEM respectivamente.

Em relação ao Índice de Circularidade, houve uma média de 0,6, na Dolina 1 e 0,5 na Dolina 2. O modelo ALOS Palsar apresentou um valor de 0,6 na Dolina 1 e 0,3 na Dolina 2. O ASTER GDEM apresentou um valor de 0,2 na Dolina 1 e 0,3 na Dolina 2. O AW3D30 apresentou um valor de 0,8 nas duas dolinas o COP DEM apresentou valores de 0,6 e 0,7 na Dolina 1 e 2 respectivamente. O NASADEM apresentou valores de 0,7 na Dolina 1 e 0,6 na Dolina 2. O modelo SRTM apresentou os valores de 0,7 na Dolina 1 e 0,3 na Dolina 2. Por fim o TanDEM-X apresentou os valores de 0,8 e 0,5 nas Dolinas 1 e 2 respectivamente. A tabela 2 sintetiza os valores aqui apresentados para melhor visualização.

Figura 2 – Delimitação de feição deprimida nos diferentes Modelos Digitais de Elevação.



Fonte: Os autores (2022).

Em relação a quantidade de polígonos gerados em toda a área de estudo, o modelo com maior quantidade de polígonos gerados foi a ASTER GDEM, com 109.254 polígonos identificados, seguido de ALOS PALSAR com 27.468 polígonos. A imagem SRTM, gerou 9.631 polígonos, a COP DEM, 6.876 polígonos, seguidos da AW3D30 e NASADEM com 3.752 e 1.695 polígonos. O MDE com menor número de polígonos gerados foi, o TanDEM X com 333 polígonos.

Tabela 2 - Valores de área e do índice de circularidade dos polígonos gerados.

Modelo Digital de Elevação	Área km ²		IC	
	Dolina 1	Dolina 2	Dolina 1	Dolina 2
Alos PALSAR	13,51	4,09	0,6	0,3

Aster GDEM	12,65	2,47	0,2	0,3
AW3D30	13,66	3,37	0,8	0,8
CopDEM	14,89	7,07	0,6	0,7
NasaDEM	14,46	3,58	0,7	0,6
SRTM	14,59	4,49	0,7	0,3
TanDEM X-90	13,40	5,18	0,8	0,5
Média	13,89	4,32	0,6	0,5

Fonte: Os autores (2022).

Desse modo, os modelos que deram menos ruídos foram AW3D30, o COP DEM e o TanDEM X90, os dois primeiros com 30 metros de resolução e o último com 90 metros. Todos os modelos conseguiram identificar as duas dolinas, porém nas imagens ASTER, AW3D30 e NASADEM, representaram a dolina 2 em dois polígonos.

Os valores de IC desse segundo polígono são de 0,6 e 0,8 para NASADEM e COPDEM. A feição do modelo ASTER teve valor de 0,2 no índice de circularidade, devido ao seu formato alongado, que tem maior relação com a rede de drenagem, do que com dolinas. Esse padrão já havia sido observado antes já que esse modelo identificou algumas áreas quadradas que podem ter sido geradas pelo traçado no terreno na área para agricultura.

4. Considerações finais

Com base nas análises realizadas que leva em consideração os valores do índice de circularidade e a quantidade de polígonos gerados, os Modelos Digitais de Elevação que melhor delimitaram as feições deprimidas da região cárstica do grupo Geológico Bambuí e do Chapadão Baiano foram a imagem ALOS (AW3D30), com 3.752 polígonos e um índice de circularidade de 0,8 para ambas as depressões resultados.

Em seguida, temos o NASADEM, com 1.695 polígonos e um índice de circularidade de 0,7 e 0,6, e o CopDEM, com 6.876 polígonos e um índice de circularidade de 0,6 e 0,7. Além disso, é importante destacar o modelo TanDEM-X, com 333 polígonos, que apresentou um índice de circularidade de 0,6 e 0,5 entre todos os modelos analisados.

Apesar de apresentar menos ruído em relação a outros modelos, o TanDEM-X apresentou um possível erro em relação à altitude mínima, o que pode resultar em distorções em áreas identificadas como dolinas. No entanto, especificamente para as dolinas identificadas, o modelo testado demonstra um desempenho notável, levando em consideração a circularidade aparente das feições.

Em um estudo anterior (Grohmann, 2018), foi apontado que as imagens TanDEM-X de 12 e 30 metros apresentam uma penetração profunda do sinal de radar em áreas de vegetação aberta, o que pode influenciar os resultados, uma vez que o TanDEM-X de 90 metros é um produto derivado dessas imagens. Vale ressaltar que a área de estudo selecionada é uma área de vegetação aberta.

A precisão altimétrica também parece ter influenciado nos resultados, já que modelos com maiores diferenças altimétricas entre as altitudes máximas e mínimas, como o ASTER GDEM e ALOS PALSAR, tiveram resultados menos precisos na identificação das dolinas, com maior presença de ruído.

Sugere-se que os dados da imagem TanDEM-X sejam reprocessados e que novos testes sejam realizados em diferentes áreas, com o objetivo de comparar e validar as análises realizadas neste trabalho.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica concedida à primeira autora, da cota institucional da UFG entre setembro de 2021 e agosto de 2022.

6. Referências

- Carvalho, O. A., Guimarães, R. F., Montgomery, D. F., Gillepsie, A. R., Trancoso, R. A., Martins, E. S. Silva, N. C. (2014). Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, 6 (1), 330-351.
- Cvijic, J., Sweeting, M. M (1983). **The dolines**. In, (Ed). Karst Geomorphology (Benchmark Papers in Geology). New York. Hutchinson Ross Publishing Company: 59, p.19-37.
- Ferreira, C. F., Uagoda, R. E. S. (2019). Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Caminhos de Geografia**, 20(70), 519-537
- Grohmann, C. H. (2018). Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, 217, 121-133.
- Hiruma, S.T., Ferrari, J. A., Amaral, R. A., Honório, R. F. (2007) Mapeamento e caracterização de feições cársticas de superfície na Faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. **Revista do Instituto Geológico**, 27(1-2),1-12.
- Pardo I., E., Valsero, J. & J. D., Dowd, P. A. (2013). Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. **Acta Carsologica**, 42(1)
- Silva, G. B., Cherem, L. F. S. & Amaral, A. K. N. (2022). O Mapeamento de dolinas utilizando Modelo Digital de Elevação na Borda Ocidental do Chapadão Central – Oeste da Bahia, Brasil. **Ateliê Geográfico**, 16 (1), 204-216.
- VALERIANO, M. de M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, (2004). **INPE**. São José dos Campos.
- ZWAHLEN, F. (2003). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report **COST action 620**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 297p.